

УДК 621.7

А. М. ФЕДОТЬЄВ, С. В. ШКЕЛЬ**ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СОБІВАРТОСТІ ПРОЦЕСУ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ МЕТОДОМ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ГВИНТОВОЮ ЕКСТРУЗІЄЮ**

Гомогенізацію алюмінієвих сплавів традиційно проводять при температурі 450-560°C кілька годин для отримання однорідної структури. Однак можна проводити гомогенізацію матеріалів методом гвинтової екструзії. Спроби застосувати цей підхід в екструзійному виробництві довгомірних профілів стикаються з низкою серйозних проблем. Показали можливість проведення гвинтової екструзії циліндричної заготовки від діаметра 150 мм до діаметра 127 мм. Порівняли питому собівартість процесів гомогенізації методами нагрівання у печі та гвинтової екструзії. Зробили висновки щодо ефективності гомогенізації методом гвинтової екструзії.

Ключові слова: пластична деформація, гвинтова екструзія, гомогенізація, питома собівартість.

А. Н. ФЕДОТЬЕВ, С. В. ШКЕЛЬ**ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СЕБЕСТОИМОСТИ ПРОЦЕССА ГОМОГЕНИЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ДЕФОРМАЦИИ ВИНТОВОЙ ЭКСТРУЗИЕЙ**

Гомогенизацию алюминиевых сплавов обычно проводят при температуре 450-560°C несколько часов для получения однородной структуры. Однако можно проводить гомогенизацию материалов методом винтовой экструзии. Попытки применить этот подход в экструзийном производстве длинномерных профилей сталкиваются с рядом серьезных проблем. Показали возможность проведения винтовой экструзии цилиндрической заготовки от диаметра 150 мм до диаметра 127 мм. Сравнили удельную себестоимость процессов гомогенизации методами нагрева в печи и винтовой экструзии. Сделали выводы относительно эффективности гомогенизации методом винтовой экструзии.

Ключевые слова: пластическая деформация, винтовая экструзия, гомогенизация, удельная себестоимость.

A. M. FEDOTIEV, S. V. SHKEL**ECONOMIC ASSESSMENT OF THE TECHNOLOGICAL COSTS OF THE GOMOGENIZATION PROCESS OF ALUMINUM ALLOYS BY THE METHOD OF DEFORMATION BY SCREW EXTRUSION**

Homogenization of aluminum alloys is traditionally carried out at a temperature of 450-560°C for several hours to obtain a homogeneous structure. However, it is possible to homogenize the materials by twist extrusion. Attempts to apply this approach to the extrusion production of long-term profiles face a number of serious problems. They showed the possibility of twist extrusion of cylindrical billet from a diameter of 150 mm to a diameter of 127 mm. In this case, the workpiece at the outlet has no distortion, and the equivalent deformation, across its cross-section, exceeds 2. In order to evaluate the methods of homogenization and the choice of the most economically efficient, the specific cost of homogenization processes was compared with the methods of heating in the furnace and twist extrusion. It includes costs that are directly related to the operation of a particular product. We made conclusions about the efficiency of homogenization by twist extrusion: the costs of the traditional homogenization process make up 6.85 UAH / kg, while the HPD process (homogenization by plastic deformation) is 0.37 UAH / kg. We see that the process HPD 94.6% more efficient than the traditional homogenization technology. In addition, the total time for homogenization of the HPD is lower during the time of homogenization in the traditional way by 78.6%.

Keywords: plastic deformation, screw extrusion, homogenization, specific cost.

Вступ. Гвинтова екструзія, як метод інтенсивної пластичної деформації дозволяє отримувати матеріали з мікрокристалічною структурою та підвищеним рівнем властивостей за значно коротший проміжок часу [1] у порівнянні із нагріванням матеріалів у печах.

Відомо [2], що для фізичного моделювання процесу потрібно виготовити серію матриць, за допомогою індукційної печі нагрівати заготовку та проводити екструзію із використанням гідравлічного преса із зусиллям 2500 т. Такий підхід потребує значних коштів, тому доцільніше провести дослідження методом комп'ютерного моделювання процесу екструзії. Для цього розробили тривимірну модель матриці (рис. 1), провели серію досліджень та отримали результати (рис. 2), в яких показана можливість виконання гвинтової екструзії циліндричної заготовки від діаметра 150 мм до діаметра 127 мм [3, 4]. При цьому, заготовка на виході не має викривлень, а еквівалентна деформація, по всьому її поперечному перерізу, перевищує 2.

Показана можливість гомогенізації шляхом гвинтової екструзії потребує економічної оцінки.

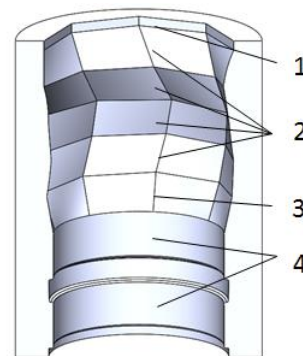


Рис. 1 – Тривимірна модель матриці з восьмигранним гвинтовим каналом (ГК):

- 1 – зона входження матеріалу із контейнера в матрицю;
- 2 – гвинтова ділянка (ГД);
- 3 – ділянка створення протитиску для ГД;
- 4 – калібрувальна ділянка.

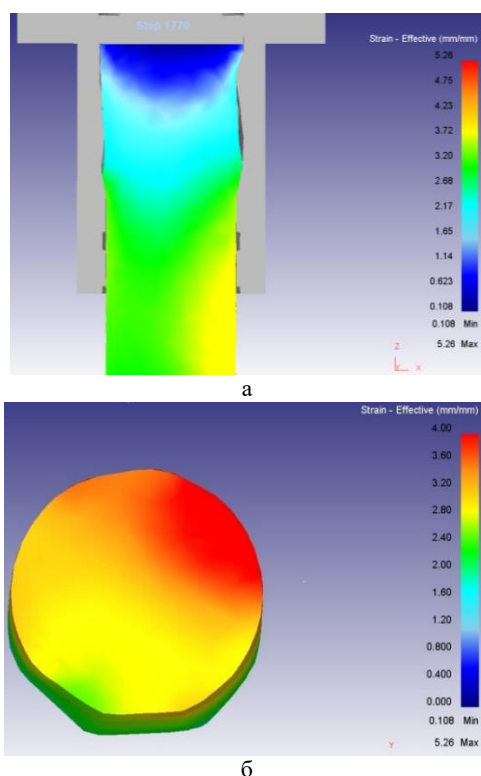


Рис. 2 – Результати комп'ютерного моделювання процесу ГЕ:
а – повздовжній переріз матриці із деформованим матеріалом,
б – переріз заготовки на виході із матриці

Постановка задачі. Для оцінки методів гомогенізації і вибору найбільш економічно ефективного можна порівняти технологічну собівартість відомих методів. Вона включає витрати, які мають безпосереднє відношення до виконання операцій над певним виробом.

У роботі буде порівняно два методи гомогенізації: пропонується метод гвинтової екструзії, та нагрівання й витримка заготовки у печі.

До процесу гомогенізації в печі нагрівають заготовку та комплект оснащення, в який входять матриця, контейнер та обійма, а потім проводять процес гомогенізації одним із вищезгаданих методів.

Технологічну собівартість гомогенізації пластичною деформацією (ГПД) розраховуємо за формулою:

$$C_T = C_{GE} + C_{P3} + C_{PKO}, \quad (1)$$

де C_{GE} – собівартість процесу гвинтової екструзії (ГЕ);

C_{P3} – собівартість розігріву заготовки;

C_{PKO} – собівартість розігріву комплекту оснащення.

Розраховуємо собівартість процесу ГЕ за формулою:

$$C_{GE} = N_{GE} \cdot C_e \cdot t, \quad (2)$$

де N_{GE} – потужність процесу ГЕ;

C_e – вартість електроенергії;

t – час, за який відбувається процес ГЕ.

Питома собівартість розраховується за формулою:

$$C_n = \frac{C_T}{m}, \quad (3)$$

де m – маса заготовки.

Час процесу t розраховується за формулою:

$$t = \frac{H}{V}, \quad (4)$$

де H – висота заготовки;

V – швидкість пресування.

Потужність пресування визначаємо за формулою [4]:

$$N_{GE} = F_{GE} \cdot V = (F_{np} + F_{тр}) \cdot V, \quad (5)$$

де F_{GE} – сила процесу ГЕ;

F_{np} – сила пресування;

$F_{тр}$ – сила тертя.

$$F_{np} = \sigma_m \cdot \delta_{деф} \cdot S_{поршня}, \quad (6)$$

де σ_m – межа текучості сплаву Al6063 АД31 за нормованими механічними властивостями згідно стандарту EN755-2;

$\delta_{деф}$ – середнє значення степеня деформації за результатами моделювання процесу ГЕ за допомогою програми Deform 3D [2];

$S_{поршня}$ – площа поршня циліндра.

$$F_{тр} = \sigma_m \cdot \mu_{тр} \cdot S_{боз}, \quad (7)$$

де $\mu_{тр}$ – коефіцієнт тертя алюмінію по сталі;

$S_{боз}$ – площа бокової поверхні заготовки.

Дані для розрахунку заносимо у табл. 1.

Таблиця 1 – Початкові дані для розрахунку

Позначення	Найменування	Розмірність	Значення
m_z	маса заготовки	кг	28,72
$m_{ко}$	маса комплекту оснащення	кг	930,78
H_o	висота заготовки	мм	600
V_{np}	швидкість пресування	мм / с	10
σ_m	межа текучості сплаву Al6063 АД31 за нормованими механічними властивостями згідно стандарту EN755-2	МПа	65
$\delta_{деф}$	середнє значення степеня деформації за результатами моделювання процесу ГЕ за допомогою програми Deform 3D	МПа	2,55
$\mu_{тр}$	коефіцієнт тертя алюмінію по сталі		0,4

Собівартість розігріву заготовки (C_3) та собівартість розігріву комплекту оснащення (C_{KO}) можна оцінити за формулою:

$$C = V_{CH_4} \cdot \Pi_{CH_4} \quad (8)$$

Ринкова вартість 1 м³ метану, $\Pi_{CH_4} = 19,98 \text{ грн} / \text{м}^3$.

Приймаємо метод нагрівання в камерній печі за допомогою теплоти згорання газоподібного природного палива. Прийнята методика розрахунку наведена у спеціалізованій літературі [5].

Результати розрахунку витрати пального й показників собівартості процесу нагрівання заготовки і елементів оснащення наведено в табл. 2.

Таким чином остаточні результати розрахунків собівартості процесу ГПД приведені у табл. 3.

Таблиця 2 – Результати розрахунку витрати пального й показників собівартості процесу нагрівання заготовки і елементів оснащення

Позначення	Найменування	Розмірність	Значення
M	кількість метану для нагрівання заготовки і елементів оснащення	кг	7,23
V_{CH_4}	кількість метану для нагрівання заготовки і елементів оснащення	м ³	10,08
$C_H = C_3 + C_{KO}$	собівартість нагрівання заготовки і елементів оснащення	грн	201,4
C_H^n	питома собівартість нагрівання	грн / кг	0,21

Таблиця 3 – Результати розрахунків собівартості процесу ГПД

Позначення	Найменування	Розмірність	Значення
$S_{блз}$	площа бокової поверхні заготовки	мм ²	376800
$F_{тр}$	сила тертя	кН	9801,08
$F_{пр}$	сила пресування	кН	5207,2
$F_{ГЕ}$	сила процесу ГЕ	кН	15009
$F_{ГЕ}$	сила процесу ГЕ	т	1500
$N_{ГЕ}$	потужність процесу ГЕ	кВт	150,1
t	час процесу ГЕ включно із нагріванням	год	1,36
$C_{ГЕ}$	собівартість процесу гвинтової екструзії (ГЕ),	грн	4,49
$C_{ГПД}^n$	максимальна питома собівартість процесу ГПД	грн / кг	0,16

Алюмінієві сплави підлягають трьом видам термічної обробки: відпалу, загартуванню та старінню. Основними видами відпалу є: дифузний (гомогенізація), рекристалізаційний і термічне зміцнення сплавів.

Після розливання злитки піддають відпалу в печі гомогенізації для підвищення однорідності структури і, як наслідок, підвищення пластичності металу. Гомогенізація представляє собою процес дифузії в твердому стані, який забезпечує розподіл дисперсних частинок і зменшує залишкові напруження. Гомогенізація є обов'язковою і необхідною операцією перед пресуванням через особливості способу отримання циліндричних заготовок. Деякі компоненти при охолодженні поверхневого шару сегрегують через спосіб охолодження (швидкого охолодження зовнішніх шарів і більш повільного – внутрішніх).

Ці ефекти можуть бути частково або повністю ліквідовані при гомогенізації відлитих заготовок. При гомогенізації температура заготовок досягає точки, при якій досягається однорідність розподілу компонентів сплаву в структурі металу.

Гомогенізацію алюмінієвих сплавів традиційно проводять при температурі 450-560°C. Після того, як ця температура встановиться в усіх заготовках,

необхідно ще близько 2,5 годин для отримання однорідної структури.

В нашому випадку приймаємо витримку в печі протягом п'яти годин. Прийнята методика розрахунку наведена у спеціалізованій літературі [6].

Результати розрахунку витрати пального й показників собівартості процесу нагрівання заготовки наведено в табл. 4.

Витрати на нагрівання обойми, контейнера, заготовки і матриці та підтримання температури печі під час процесу гомогенізації:

$$C^n = C_H^n + C_{ГН}^n = 0,21 + 6,64 = 6,85 \text{ грн} / \text{кг}$$

Витрати на нагрівання обойми, контейнера, заготовки і матриці та процес гомогенізації методом екструзії:

$$C^n = C_H^n + C_{ГПД}^n = 0,21 + 0,16 = 0,37 \text{ грн} / \text{кг}$$

Висновки. Отже витрати на традиційний процес гомогенізації складають – 6,85 грн/кг, а на процес ГПД – 0,37 грн/кг. Бачимо, що процес ГПД на 94,6 % ефективніший ніж гомогенізація за традиційною технологією. Окрім того загальний час на гомогенізацію ГПД менший за час гомогенізації традиційним способом на 78,6 %.

Таблиця 4 – Результати розрахунків процесу гомогенізації заготовки методом нагрівання у печі

Позначення	Найменування	Розмірність	Значення
$Q_{нагр}$	питома витрата метану для нагрівання заготовки	кг / год	1,3714
V_{CH_4}	питома витрата метану для нагрівання заготовки	м ³ / год	1,91
t	час процесу ГЕ включно із нагріванням	год	6,35
C^n	питома собівартість процесу гомогенізації	грн / год	38,16
$C_{ГН}$	собівартість процесу гомогенізації заготовки методом нагрівання у печі	грн	190,8
$C_{ГН}^n$	питома собівартість процесу гомогенізації заготовки методом нагрівання у печі	грн / кг	6,64

Список літератури

1. Деформационная обработка вторичного алюминия и алюминий содержащих отходов / [А. И. Шевелев, Я. Е. Бейгельзимер, В. Н. Варюхин и др.]. – Донецк: ДонФТИ НАН Украины, 2011. – 327 с.
2. Федотьев А. М. Застосування гвинтової екструзії з метою гомогенізації алюмінієвих сплавів при виробництві профілів / А. М. Федотьев, Я. Ю. Бейгельзимер, С. В. Шкель // Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2018. – № 1 (46). – С. 48–53.
3. Бейгельзимер Я. Ю. Моделирование процесса интенсивной пластичной деформации методом гвинтовой экструзии / Я. Ю. Бейгельзимер, А. М. Федотьев, С. В. Шкель // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 17-й Международной научно-практической конференции, 04–08 сентября 2017 г., г. Одесса. – Киев: АТМ Украины, 2017. – С. 33–36.
4. Перлин И. Л. Теория прессования металлов / И. Л. Перлин, Л. Х. Райтбарг. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1975. – 448 с.
5. Методические указания самостоятельной работы и практических занятий по курсу “Технология нагрева и нагревательных устройств КШЦ” по образовательной программе подготовки бакалавра. МУ-ХПИ-МТ.ОМД23.12.2007. Составили В.И. Кузьменко, Тихомиров Ю.С. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2008. – 86 с.
6. Тепловой баланс печи: методические указания по курсовому проектированию металлургических печей сост.: Е. П. Карамышева, И. П. Маклакова. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2009. – 18 с.

References (transliterated)

1. Deformatsionnaya obrabotka vtorichnogo alyuminiya i alyuminiy soderzhashchih othodov / [A. I. Shevelev, Ya. E. Beygelzimer, V. N. Varyuhin i dr.]. – Donetsk: DonFTI NAN Ukrainyi, 2011. – 327 p.
2. Fedotev A. M. Zastosuvannya gvintovoyi ekstruziyi z metoyu gomogenizatsiyi alyuminitviv splaviv pri virobnitstvi profiliv / A. M. Fedotev, Ya. Yu. Beygelzimer, S. V. Shkel // Obrabotka materialov davleniem: sbornik nauchnykh trudov. – Kramatorsk: DGMA, 2018. – No 1 (46). – PP. 48–53.
3. Beygelzimer Ya. Yu. Modelyuvannya protsesu Intensivnoyi plastichnoyi deformatsiyi metodom gvintovoyi ekstruziyi / Ya. Yu. Beygelzimer, A. M. Fedotev, S. V. Shkel // Kachestvo, standartizatsiya, kontrol: teoriya i praktika: Materialy 17-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, 04–08 sentyabrya 2017 g., g. Odessa. – Kiev: ATM Ukrainyi, 2017. – PP. 33–36.
4. Perlin I. L. Teoriya pressovaniya metallov / I. L. Perlin, L. H. Raytbarg. – 2-e izd., pererab. i dop. – Moscow: Metallurgiya, 1975. – 448 p.
5. Metodicheskie ukazaniya samostoyatelnoy raboty i prakticheskikh zanyatiy po kursu “Tehnologiya nagreva i nagrevatelnykh ustroystv KShTs” po obrazovatelnoy programme podgotovke bakalavra. MU-HPI-MT.OMD 23.12.2007. Sostavili V.I. Kuzmenko, Tihomirov Yu.S. – Kharkov: NTU “HPI”, 2008. – 86 p.
6. Teplovoy balans pechi: metodicheskie ukazaniya po kursovomu proektirovaniyu metallurgicheskikh pechey sost.: E. P. Karamyisheva, I. P. Maklakova. – Lipetsk: Izdatelstvo LGTU, 2009. – 18 p.

Надійшла (received). 18.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Федотьев Андрій Миколайович (Федотьев Андрей Николаевич, Fedotiev Andriy Mykolayovych) – кандидат технічних наук, доцент; начальник відділу інновацій Алюмета груп, Бровари, Україна; e-mail: a.fed450@gmail.com.

Шкель Сергій Володимирович (Шкель Сергей Владимирович, Shkel Serhii Volodymyrovych) – магістр; інженер-дослідник відділу інновацій Алюмета груп, Бровари, Україна; e-mail: shkelsv@gmail.com.